

## シミュレーションによる 落雷時雲内電荷分布と誘導イオン層の役割の考察

今井 光祐・黒飛 孝治・河野 俊彦

### On the Charge Distribution in a Thundercloud and the Role of Induced Ions

Mitsuhiro IMAI, Kouji KUROTOBI and Toshihiko KOUNO

#### ABSTRACT

Through the calculation of the electric fields under some static model thunderclouds, it is investigated how space charges are distributed when a lightning strikes the ground, and also the role of each charged region is investigated. By comparison with the breakdown electric field it becomes evident that the size of the upper charged region in a thundercloud is related to the possibility of the occurrence of the lightning discharge toward the ground, and by comparison with observed surface electric field in winter it also becomes evident that the induced ion layer which consists of released ions from objects on the ground works as a shield against the strong electric field produced by the thundercloud and ensures a lightning discharge.

キーワード : 雷、空間電荷、雷雲、電荷分布

#### 1. まえがき

雷現象は非常に身近な物理現象であり、人類の誕生以来、人々の畏怖の対象となってきた現象である。近年、素粒子物理、宇宙物理等の分野での目ざましい発展により、次第に自然に対する理解が深まりつつあるにもかかわらず、雷に関する研究はそれほど劇的な進展を見ていない感がある。18世紀フランクリンによる「雷は大気中における放電現象である」という発見以来、室内実験による放電現象の解明はなされてはいるものの、雷に関する知識はそれほど増えていないように思われる。しかし、落雷による電力送電線障害、雷現象に伴う電磁波ノイズによる計算機障害など、社会の高度情報化と共に、雷現象の社会的な影響はますます大きくなってきている。著者らは雷現象への物理的な純粋な興味と共に、増大しつつある社会的影響を考慮しながら、雷雲構造の理解、雷

現象の解明を望んでいる。

雷雲構造を物理的に理解するためには、雷雲の成長・発展を時間的に追いかけて、その基本的なメカニズム、要因を探る必要がある。しかし、雷雲は雲内における電荷の生成・分離という微視的な物理過程から、荷電粒子の輸送という巨視的な物理過程までを含む総合過程であり、流体の流れのシミュレーションなどの大規模な計算機シミュレーションの容易になった今日においても、雷雲の生涯をシミュレートすることは非常に困難なものの1つである。そこで、まず第一歩として、落雷という社会的影響のもっとも大きな現象に注目し、落雷時の空間電荷分布について、電界計算を通して理解することを目的とした。これは、落雷予測などに必須の知識であり、雷現象理解への重要なステップであると考えからである。

本論文はここ1～2年にわたって電気学会などで口頭

発表してきたものにその後の考察を加えて集約したものである。第2節では、落雷時の雲内帯電領域について、第3節では、我々の採った計算法について、第4節では落雷要因について、第5節では、各帯電領域の受け持つ役割について、夏季・冬季における雷雲の作る電界の計算を通して考察する。

## 2. 落雷時雲内電荷分布

熱雷の場合、雷雲は次のように形成されると言われている。まず、湿った空気が熱的不安定性のために上昇気流となり、上空へ運ばれ、過飽和状態となる。そして、凝固核を捕らえて凝結した後、上昇する乱気流に揉まれながら、ある種の摩擦現象によって電荷が分離・生成され、気流、自由落下などの輸送機構によって雷雲内での大域的な電荷の分離・蓄積が起きるといえるものである。

また、近年、飛行機や気球による観測、地上における多地点同時観測、あるいは、限定された雷雲の計算機シミュレーションなどによって、雷雲内の電荷分布について、わずかずつではあるが、知られるようになってきた（しかし、気象学的・地理学的条件などの相違による季節・地域差が大きく、計算機シミュレーションにおいても電荷の生成・分離機構に関する理解の不足から、限定されたものであり、不明な点が多く残っている）。なかでも、用いた観測手法の違いによる差異は見られるものの、「雷雲内で気温が $-10^{\circ}\text{C}$ ～ $-15^{\circ}\text{C}$ となる高度において負電荷が、また、 $-25^{\circ}\text{C}$ ～ $-30^{\circ}\text{C}$ となる高度において正電荷が蓄積される」ということは一般的な観測事実として認められている。また、エルスターとガイテルの浮遊粒子説やボグネの対流説など、電荷の生成・分離に関する理論の多くは一般の雨雲中におけるダイポール構造を説明している。

そこで、我々は、足がかりとして、落雷時の雲内電荷分布を図1のようなダイポール構造と仮定した。計算を簡単にするための第一近似として、それぞれの帯電領域は直方体とし、領域内では電荷は一様に分布しているとする。しかし、後に述べるように、このようなダイポール構造では落雷時の電界条件を満たすことができず、第3の電荷群を仮定する必要がある。

## 3. 落雷時の電界条件と空間電荷分布の計算手法

落雷時の空間電荷分布のモデルを決めるに当たって次の2点を考慮しなければならない。すなわち、モデル電荷分布が作る電界は、

- i) 落雷時の観測データと矛盾しない、
- ii) 実際に、雷放電が起きるために、放電開始点において大気破壊電界強度に達している、ことが必要である。i) については、石川県河北潟にお

けるロケット誘雷観測のデータを用いて、雷雲直下の地表における電界強度は次式で表す条件を満たすものとする。

$$E = 15 \text{ kV/m} = 0.15 \text{ kV/cm} \quad (1)$$

一方、ii) に関して、すでに我々は、平等電界中における標準大気の大気破壊電界強度を $25 \text{ kV/cm}$ として、標高（ $h \text{ km}$ ）による気温・気圧変化を考慮した大気破壊電界強度（ $E \text{ kV/cm}$ ）の補正式を次のように得ている。

$$E(h) = \begin{cases} 6.72 \times 10^{-2} (h-17.6)^2 + 4.67, & (\text{冬の場合})(2-a) \\ 5.14 \times 10^{-2} (h-23.4)^2 - 2.30, & (\text{夏の場合})(2-b) \end{cases}$$

そこで、雷雲中心軸上の地上落雷が可能な標高地点を放電開始点と考え、その地点においてモデル電荷分布が作る電界強度が式(2-a, b)を用いて計算した値となることを条件とする。

さて、空間内の電荷分布が作る電界は、図1のような場合、

$$\vec{E}(\vec{x}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \iiint d\vec{y} \frac{\rho(\vec{y})(\vec{x}-\vec{y})}{|\vec{x}-\vec{y}|^3} + [\text{image}] \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $\rho(\vec{y})$ は電荷密度であり、[image]は地表面を等電位面とするために考える鏡像電荷からの寄与を表す。各帯電領域を直方体とし、領域内で電荷は一様に分布しているとすると、上の3重積分は、解析的に2回、積分することができて、ポアソン方程式を解くよりも格段に早く計算できる。また、上に述べた条件はポテンシャルでなく電界に対する条件となっているため、以下の計算ではすべて式(3)を用いて、直接、電界を計算した。

落雷時の電荷分布を求めるために我々の採った手法は、

- A) 適当な帯電領域を設定し、
- B) 落雷時の電界条件を満たすように各領域内での電荷密度を計算する、
- C) 地表電界などの重要な電界を計算する、
- D) 結果を観測データなどと比較・検討し、
- E) 矛盾があるようであれば、A)に戻り、最適な空間電荷分布を求める、

というものである。

## 4. ポケットチャージ、トライポール構造、イオン層

図1のようなダイポール構造を仮定すると、雷雲上部と下部に蓄積される電荷は雷雲内で作られたものと考えなければならない。すなわち、雷雲内の総電荷量は0でなければならない。

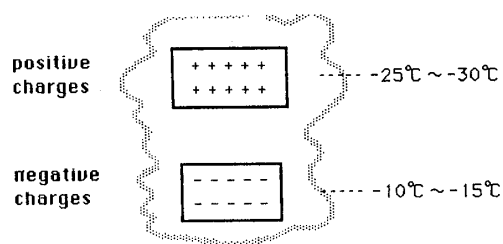


Fig.1 The dipole structure in a thundercloud

$$\iiint_{\text{upper}} d\vec{x} \rho(\vec{x}) + \iiint_{\text{lower}} d\vec{x} \rho(\vec{x}) = 0 \quad (4)$$

この付加的な拘束のために、前節で述べた2つの電界条件を同時に満たすことはできなくなり、落雷時の電荷分布としては単純なダイポール構造だけでは不十分であることがわかる。この点の理論的解決には次のような2つの異なった方針が考えられる。一つは落雷時の電界条件のうちii)を捨てて、代わりに、電界が弱い場合にも放電が生じるための放電開始メカニズムを考えるというものである。このようなメカニズムとして、宇宙線などが放電の引金となり得ると考えられる。しかし、著者の一人(河野)のイオン中放電に関する実験から、イオン中においても大気破壊電圧は低下しないことを得ている<sup>4)</sup>。我々はこれに矛盾しないように、条件ii)を落雷時の必要条件とし、次のような考え方を採る。すなわち、次に述べるように3通りに考えられる第3の電荷群を仮定し、上の条件を満たすための自由度を増やすことにする。

#### a) ポケットチャージ

以前より雷雲内の下部帯電領域内にはポケットチャージと呼ばれる小さな正電荷群が存在すると言われている。ポケットチャージ周辺で電界が強くなり、大気破壊(放電・落雷)が起きると考えられる。そこで、図2のように第3の帯電領域を配置してポケットチャージを模擬し

Table 1 Charge densities in the pocket charge and the cloud. The size of the upper and lower charged region is fixed  $[(1.0\text{km})^3]$ .

size of the pocket charge		$(100\text{m})^3$	$(50\text{m})^3$	$(20\text{m})^3$	$(10\text{m})^3$
summer	lower charged region in the cloud ( $\text{nC}/\text{m}^3$ )	-22.46	-21.94	-21.79	-21.77
	pocket charge ( $\text{nC}/\text{m}^3$ )	504.85	1020.17	2557.71	5117.49
winter	lower charged region in the cloud ( $\text{nC}/\text{m}^3$ )	-4.89	-4.00	-3.75	-3.72
	pocket charge ( $\text{nC}/\text{m}^3$ )	890.82	1796.44	4501.17	9005.17

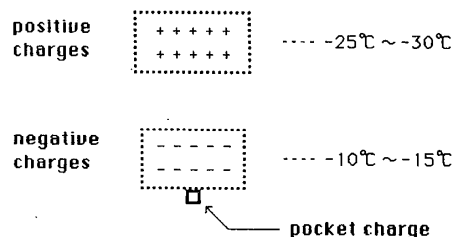


Fig.2 The dipole model with a pocket charge

た。図3-a, bはそれぞれ地表電界、雷雲中心軸上での電界の様子である。また、表1はポケットチャージの大きさを変えた場合の各帯電領域内での電荷密度である。地表電界の様子はポケットチャージのないダイポール構造の場合とほとんど変わらない。軸上での電界はポケットチャージの周辺において非常に強い電界となり放電が可能となることを示している。しかし、電荷密度を見ると、ポケットチャージ内の電荷密度は、周辺の帯電領域

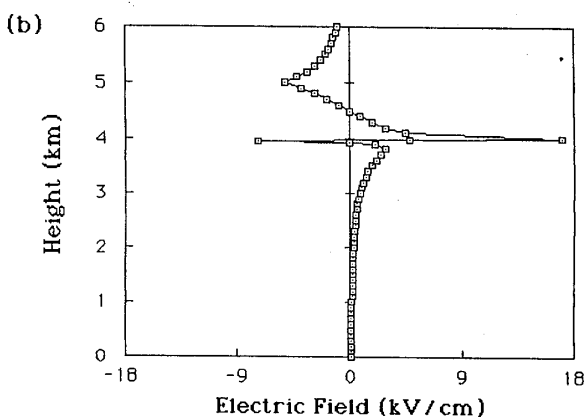
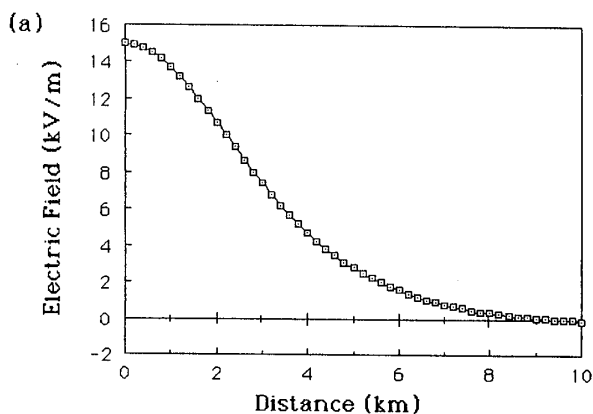


Fig.3 The electric field produced by a dipole thundercloud with a pocket charge  
(a) On the ground (b) On the z-axis

に比べて、非常に高くなっている。ポケットチャージの成因についてはいろいろ考えられるが、反応・輸送過程を伴う開放系に特有の「ゆらぎ」と捕らえるのが適当であろう。そうすると、このように非常に密度の高いゆらぎのパターンが形成されるとは考えにくい。ひとまず、ポケットチャージが落雷の第一原因と考えるより他の考え方を模索するのが適当と思われる。

#### b) トライポール構造

ウィルソンによる地上電界の観測以来、雷雲はダイポール構造をしていると考えられてきた。しかし、近年、ニューメキシコやフロリダにおける雷雲(熱雷)観測によると、ダイポール構造に、気温が0℃となる高度付近に正に帯電した領域を伴った、トライポール構造を持つものが多いことが観測されている。また、計算機シミュレーションの結果の中にもトライポール構造と考えられるものが報告されている。この場合、イオン層と異なり、第3の電荷群は雷雲内で生成されたものと考えられる。ダイポール構造にしても、トライポール構造にしても、そのような大域的な電荷の分離・蓄積が起きる機構に関して、定説はない。このようなトライポール構造も考慮する必要があるように思われる。

#### c) イオン層

雷雲が発達するにつれて、雷雲に伴う地表電界が強まり、ある程度以上に強まると地上物体からイオンが誘導・放出されると考えられる。これらの誘導イオンはクーロン力により、また、雷雲中心軸上の上昇気流により、上空へ運ばれる。一方、放出された誘導イオンは雷雲の作る電界を遮蔽するように働く。従って、ある程度のイオンが放出された後、イオンの放出は不活発になり、放出された誘導イオンは高さ方向に限られた層状をなすと考えられる。特に、地表電界を考えると、地上物体からの誘導イオンは無視できなくなり、誘導イオン層を考慮した雷雲構造を考えなければならない。

次節では、トライポール構造、誘導イオン層を伴った場合を考え、各帯電領域の大きさを変えた場合の電界分布の様子から、それぞれの帯電領域の役割について考察する。

### 5. 帯電領域の大きさとその役割

帯電領域の大きさは、雷雲構造の1つの単位である雷雲セルの大きさによって決ってくる。雷雲セルの大きさは、大まかなところ、対流にみられる六角セルのように温度差、流体の粘性等の諸条件によって決ってくると考えられる。ここでは、雷雲セルの大きさについては雷雲外形から予想される程度とし、各帯電領域の大きさの差違がどこから来るのか、その意味するところは何かにつ

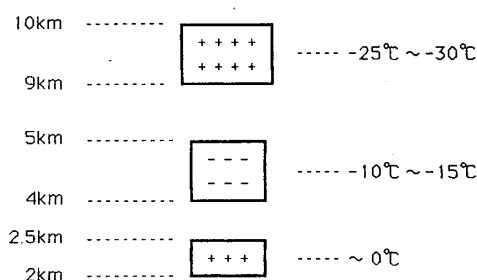


Fig.4 The tripole model for a summer thundercloud

いて考えることにする。

雷雲内上部帯電領域についてはトライポール構造を仮定した夏季雷雲の場合の計算結果を、イオン層については冬季雷雲の場合の計算結果を用いて考察することにする。

#### a) 雷雲内上部帯電領域(夏季雷雲の場合)

夏季、太平洋側に見られる雷雲(熱雷)の雲底は2~4 km程度、雲頂は10~16km程度と観測されている。そこで、トライポール構造を仮定し、雷雲内帯電領域を図4のように配置する。

全ての帯電領域の大きさを同じに取った場合、雷雲中心軸上の電界は図5のようになる。図中の破線は(2-a)式から計算した大気破壊電界強度である。これを見ると確かに地上落雷への放電開始点と考えている標高(4 km)において大気破壊電界強度に達している。しかし、雷雲上部において電界は大気破壊電界強度をはるかに超えている。従って、地上落雷が起きる以前に上部において雲内放電が起きるはずであり、落雷時の空間電荷分布としては不適当なものである。

ここで帯電領域の水平方向への広がりを決定する要素

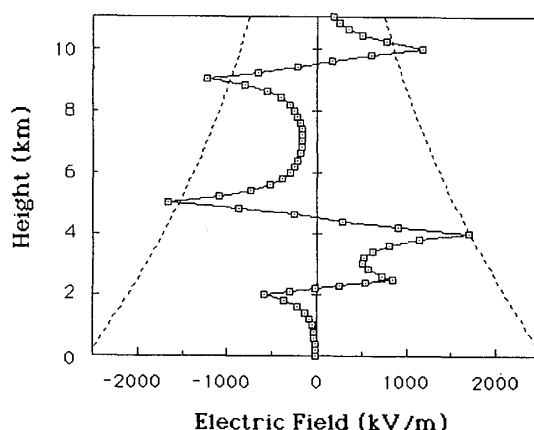


Fig.5 The electric field on the z-axis produced by a tripole thundercloud

を考えてみる。夏季、太平洋側に発生する雷雲の多くは熱雷と呼ばれる種類のものであり、大気の熱的な不安定性が大きな要因となっている。この不安定性は大気圏内に対流を作り出し、雷雲はこの対流の上昇気流となっている部分に発生する。雷雲内の荷電粒子（氷晶、あられ、雪、雨滴など）はほとんどが酸素・窒素分子より大きく、数 $\mu\text{m}$ ～数 $\text{mm}$ 程度の大きさであり、その水平方向の運動のほとんどは気流によって支配されると考えられる。雷雲上部では気流は外向きに広がるように流れているため、十分発達した雷雲セルでは上部帯電領域の方が水平方向の広がり大きいと考えられる。雷雲の外形と帯電領域は必ずしも一致するとは限らないが、実際、成熟期の雷雲の外形は上部の方が広がっている。そこで、下部、及び、中層部帯電領域の大きさは固定して、上部帯電領域の大きさだけを変化させて計算してみた。

図6-a, bは、それぞれ、地表電界、雷雲中心軸上での電界であり、表2は各領域内の電荷密度である。地表での電界の様子は雷雲上部の帯電領域の大きさにあまり影響されないことがわかる。一方、雷雲中心軸上での

電界の様子には大きな変化がみられる。上部の帯電領域の大きさが他の帯電領域のそれに比べて大きい場合（ $2.0\text{km} \times 2.0\text{km} \times 1.0\text{km}$ ）雷雲上部での電界は大気破壊電界強度を大きく下回るようになる。このように雷雲上部の帯電領域を大きく取ることによって上部での電界が弱くなるのは、表2からわかるように、その電界に最も大きく寄与すると考えられる上部帯電領域内の電荷密度が領域の大きさに反比例するかのようになくなるためと考えられる。この場合、雷雲内中層部付近で大気破壊電界強度に達しているため、大地へ向かう放電、すなわち、地上落雷が発生する可能性が考えられる。しかし、実際に地上落雷が発生するかどうかは確率的な要素も含まれるため放電開始メカニズムを考慮しなければならない。

これらの計算結果から、次のことがわかる。

◎雷雲内、上部帯電領域の大きさは、雷雲上部での雲内放電を引き起こすか、地上落雷が可能となるかを決定する。

このことは雷雲発達の初期段階において雷雲上部にみられる雲内放電を、また、最終的に地上落雷にいたる様子を定性的に説明する。雷雲内で生成された負電荷は下部に蓄積され、正電荷の方は気流に乗り、その密度を変えずに上昇していく。大気破壊電界強度は上空に行くほど低くなるため、雷雲中層部には放電が可能となるほどの負電荷が蓄積されていないにもかかわらず、正電荷の方が先に雷雲上部で大気破壊電界強度に達して放電を起こす。この放電によって正電荷の一部は（負電荷も）消費されるが、一部は生き残り雷雲上部に蓄積されていく。雷雲上部では気流の影響を受け、その領域は広がっていくため、しだいに電荷密度は低くなっていく。このように、雷雲上部での放電を繰り返しながら、上部には電荷密度の低い大きな帯電領域が、中層部には地上落雷を起こすほど電荷密度の高い帯電領域が形成されていく。したがって、落雷時の雲内帯電領域は雷雲中層部に比べて上部の方が大きいと考えられる。

Table 2 Charge densities in a tripole model.

The size of the charged region other than upper one is fixed: the middle one is  $(1.0\text{km})^3$ , and the lower one  $(1.0\text{km})^2 \times 0.5\text{km}$ .

size of the upper charged region	$(1.0\text{km})^2 \times 1.0\text{km}$	$(1.5\text{km})^2 \times 1.0\text{km}$	$(2.0\text{km})^2 \times 1.0\text{km}$
upper charged region	51.16 nC/m <sup>3</sup>	22.73 nC/m <sup>3</sup>	12.78 nC/m <sup>3</sup>
middle charged region	-70.97	-70.96	-70.95
lower charged region	39.60	39.62	39.65

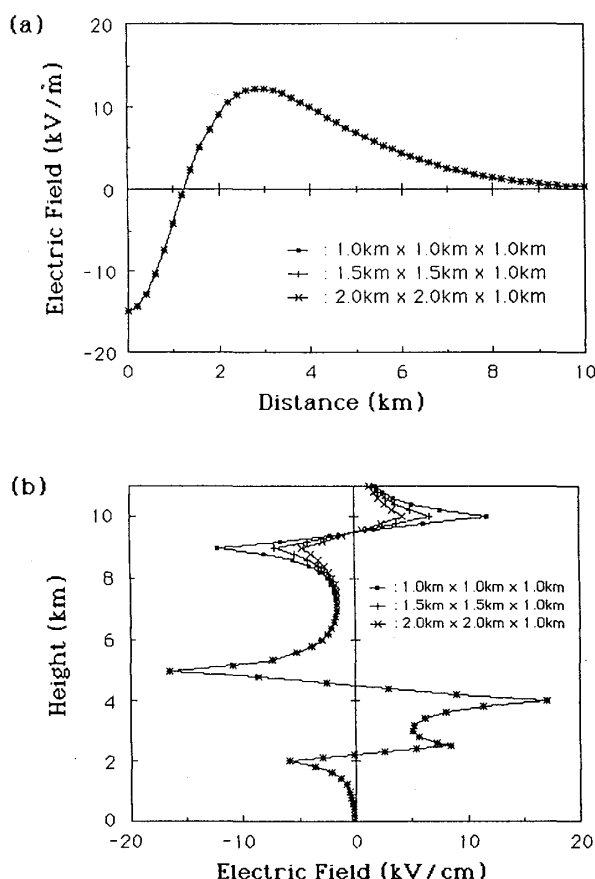


Fig.6 The electric fields produced by tripole thunderclouds with a different upper charged region in size  
(a) On the ground (b) On the z-axis

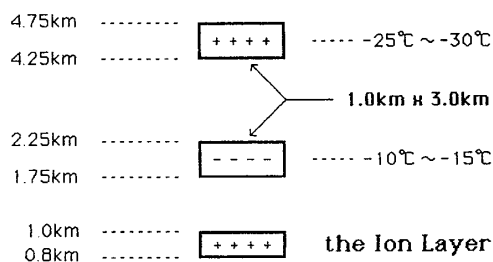


Fig.7 An arrangement of an ion layer and charged regions in a winter dipole thundercloud

b) イオン層 (冬季雷雲の場合)

冬季、シベリアからの季節風に運ばれ、日本海側に飛来する雷雲は、気温が低いと雲底も低く、季節風の影響を受け南北に細長い外形をしている。すでに、地表において気温は0℃位まで下がっているため、トライポール構造を仮定することには無理があるように思われる。そこで、第3の電荷群としてイオン層を考え、図7のようにイオン層、雷雲内帯電領域を配置し、冬季雷雲を模擬した。

イオン層を含めて各帯電領域の大きさを同じに取った場合の地表電界の様子を図8に示す。この場合、雷雲直下の地表電界 (15 kV/m) より、周辺部における電界の方がはるかに強くなっている。これは、地表電界の定点観測データと比較しても、不自然に思われる。イオン層は、雷雲内の電荷が作る電界によって誘導・放出され形成されたと考え、導入したものである。イオンが物体の束縛から逃れ大気中に出て行くためには束縛エネルギー以上のエネルギーを獲得する必要がある。雷雲に伴うイオン層を考える場合、このエネルギーは雷雲内電荷の作る電界から供給されたと考えなければならない。したがっ

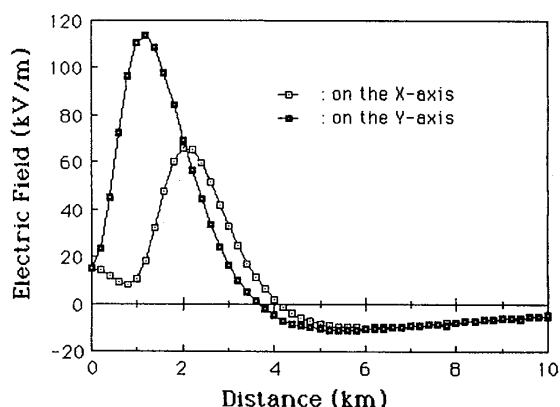


Fig.8 The surface electric field produced by a winter thundercloud with an ion layer

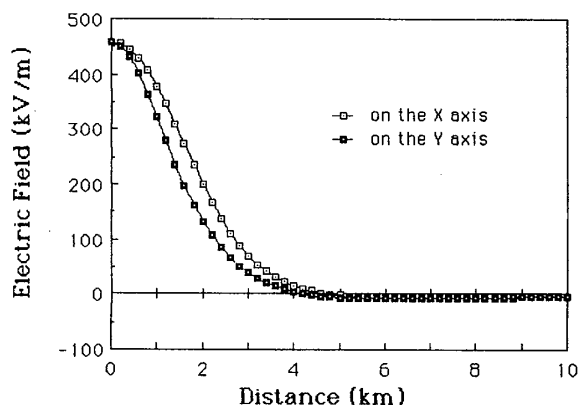


Fig.9 The surface electric field produced by a winter dipole thundercloud

て、地表電界がある値以上になった地域でイオンが放出され、イオン層の大きさも雷雲内電荷の作る地表電界によって決ってくると考えられる。図9はイオン層からの寄与を無視した場合の地表電界の様子である。この図から、適当な電界強度を設定しイオンが放出される地域を決めた後、イオン層の大きさを決め、地表電界を計算し

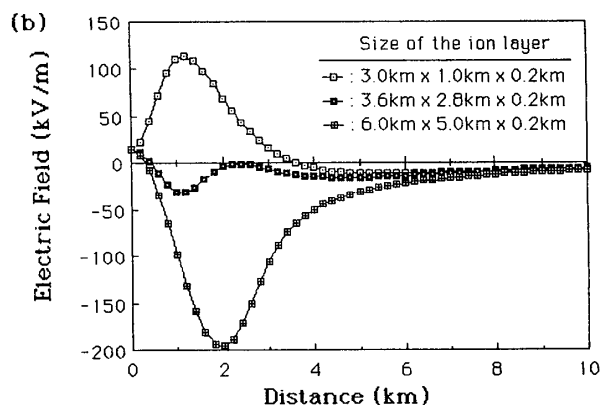
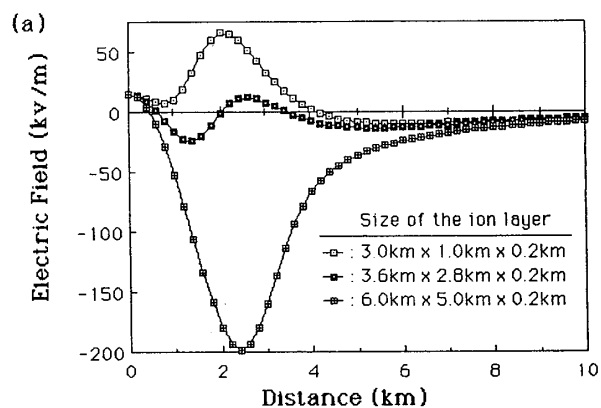


Fig.10 The surface electric fields produced by winter thunderclouds with a different ion layer in size  
(a) On the x-axis (b) On the y-axis

た結果を図10に示す。イオン層の大きさを変えるにつれて雷雲の作る地表電界が遮蔽されていく様子が読み取れる。したがって、

- ◎イオン層の大きさ（水平方向の広がり）は、雷雲電荷の作る地表電界によって決まり、
- ◎イオン層は、雲底における大気破壊電界強度を保証しながら、雷雲の作る非常に強い地表電界を遮蔽するように働く

ことがわかる。

最後に、図11-a, bに、冬季雷雲について、地上落雷の可能性を考慮して上部帯電領域を大きく採り、イオン層の大きさを適当に決めた場合の雷雲中心軸上の電界と地表電界の様子を示しておく。

## 6. まとめ

本論文では、落雷時空間電荷分布が作る電界を計算し、その妥当性を検討することによって、上部帯電領域、イオン層の意味、役割について考えてきた。得られた結果をまとめると次のようになる。

1. 落雷時空間電荷分布は、イオン層も含めて、トライポール構造をしている。
2. 落雷時には、雷雲上部の帯電領域の水平方向の広がり、下部帯電領域のそれに比べて、大きく、電荷密度は低い。
3. 地上物体から放出され、形成されと考えられるイオン層は雷雲の作る電界によってその大きさが決まり、地表面上では雷雲電界を遮蔽するように働く。

これらは、直方体の帯電領域内に電荷が一様に分布していると仮定して計算した結果に基づくものであるために、いくつかの懸念があるかも知れない。そのような懸念の1つに、帯電領域を直方体としたことで、金属導体の場合のようなエッジ効果が見られるのでは？ということがよく指摘される。しかし、金属導体とは異なり、電荷は体積分布しているため、帯電領域の境界と等電位面は一致しない。等電位面は滑らかであり、帯電領域を直方体にしたことによる特異性は出てこない。また、一様電荷分布という仮定の妥当性が懸念される。この点に関して、ポケットチャージほど極端ではないが、電荷分布に比較的ゆるやかな非一様性を導入し、電界を計算してみた。その結果、電荷分布の非一様性は帯電領域外での電界にはそれほど影響を与えないことが確かめられた。

本論文で行った考察では、帯電領域内深部での電界を用いていないので、上の結論は定性的にはほぼ正しいと考えられる。また、用いた空間電荷分布モデルも、落雷時の電荷分布として、ほぼ適切なものと考えてよいように思われる。

しかし、より現実的な空間電荷分布モデルを求めるためには、ここでは無視したポケットチャージや宇宙線などの放電開始メカニズムを考慮する必要があると考えられる。これらについては今後の課題としたい。

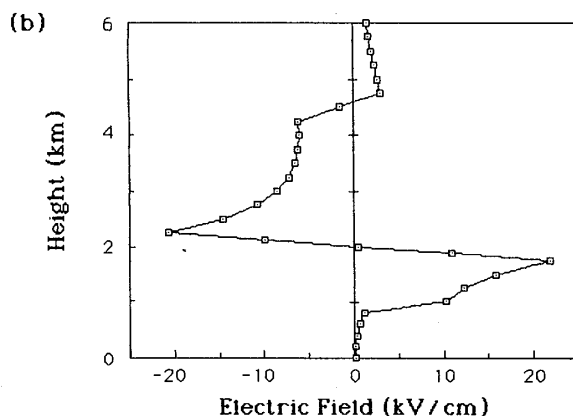
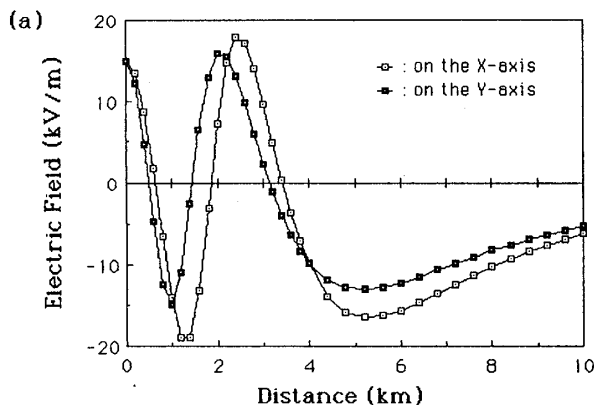


Fig.11 The electric field produced by a winter thundercloud with an ion layer  
(a) On the ground (b) On the z-axis

## 参考文献

- 1) 竹内 利雄：「雷放電現象」，第2章（1987）
- 2) 桜野 仁志他：電気学会論文誌B，106-B，685(1986)
- 3) T.KOUNO and M.IMAI: Res. Lett. Atoms. Electr., 8, 91(1988)
- 4) 河野俊彦，堀井憲爾：放電高電圧合同研究会資料，ED-86-17/HV-86-2(1986)
- 5) W.P.WINN: J. Geophys. Res., 86, 1187(1981)
- 6) T.TAKAHASHI: J. Atoms. Sci., 41, 2541(1984)
- 7) 河野俊彦，今井光祐：平成2年電気学会全国大会，2-143